

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ЗЕМЛИ

Доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки РФ

М.Д. ХУТОРСКОЙ

(Геологический институт РАН)

Рассмотрены виды приходных и расходных компонентов энергетического баланса Земли и дана их количественная оценка. Генерация энергии за счёт первичной аккреции, гравитационной дифференциации земного вещества, радиоактивного распада долгоживущих изотопов и приливного трения суммарно превышает расход энергии за счёт излучения кондуктивного теплового потока и конвективного теплопереноса в районах вулканизма континентов и океанов. Таким образом, наша планета ещё очень далека от “тепловой смерти”.

Наша планета – это гигантский тепловой генератор. В её недрах происходят процессы, приводящие к выделению, трансформации или поглощению тепловой энергии.

К первичным источникам энергии относятся: начальная внутренняя теплота Земли, обусловленная нагреванием при аккреции¹ космических частиц из протопланетного облака, изменение потенциальной гравитационной энергии Земли в процессе плотностной дифференциации её вещества; изменение кинетической энергии вращения Земли, что сопровождается превращением

механической энергии в тепловую посредством приливного трения и перепада высот приливов и отливов; высвобождение внутриатомной энергии при распаде радиоактивных элементов и при поглощении Землёй внешнего нейтринного потока.

Солнечное излучение

Помимо внутриземных источников энергии нужно, конечно, отметить солнечное излучение, падающее на земную поверхность. Абсолютная величина этой энергии огромна: она в 10 тыс. раз превышает величину теплового потока из недр, составляя в среднем 340 Вт/м^2 , или $5.5 \cdot 10^{24} \text{ Дж/год}$. Однако 40% этой энергии сразу же отражается от поверхности, то есть альbedo земной поверхности равно 0.4;

¹ Аккреция (лат. *accrētio* “приращение, увеличение”) – процесс приращения массы небесного тела путём гравитационного притяжения материи (обычно газа) на него из окружающего пространства.

остальная часть энергии после ряда преобразований в атмосфере, гидросфере и биосфере преобразуется в инфракрасное излучение, нагревающее эти геосферы, а затем практически полностью (98%) излучается обратно в космос. Лишь 2% этой энергии расходуется на разрушение коренных пород земной коры и превращение их в осадочные породы, а также накапливается в органическом веществе и в горючих полезных ископаемых. Таким образом, очень малая часть солнечной энергии сохраняется на земной поверхности и в ещё меньшей степени она проникает в недра. Тем не менее, солнечная радиация определяет температуру поверхности и самого верхнего слоя земной коры.

Температура земной поверхности периодически меняется, что связано с изменением интенсивности инсоляции. Например, в течение суток происходят суточные колебания температуры, в течение года – сезонные колебания, в течение геологических эпох – климатические колебания. Толщина слоя суточных колебаний распространяется только на почвенный слой и составляет 0,9–1,2 м, а сезонных – достигает 18–40 м. Подошва слоя сезонных колебаний называется “нейтральным слоем”, а сам слой, где проявляется влияние солнечной радиации, назван гелиотермозоной. Факт существования “нейтрального слоя” описал М.В. Ломоносов в своей магистерской диссертации “О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном”. Работая на шахтах Саксонии и измеряя температуру в штольнях на разных глубинах, он установил, что вне зависимости от сезона температура на глубоких горизонтах практически постоянная.

Он писал: “...Воздух в рудниках во всякое время целого года сохраняет равное растворение, где рудокопы ни от летних жаров, ни от зимних морозов не претерпевают никакого беспокойства. Напротив того, на внешнем воздухе летом зной, зимою стужа господствует...”. Ниже гелиотермозоны располагается геотермозона – это слой, температура в котором контролируется распределением внутренних источников тепла в теле нашей планеты. На глубинах ниже “нейтрального слоя” температура остаётся практически постоянной и не зависит от перемен, происходящих на поверхности под влиянием солнечной радиации.

Следует помнить, что представление об инвариантности температуры верно только для принятой точности нашей измерительной аппаратуры. Если точность аппаратуры увеличить на порядок, то толщину гелиотермозоны тоже придётся пересматривать. Для проблемы определения внутренней температуры Земли и глубинных теплопотерь инсоляционные процессы можно не учитывать. Считается, что в геологических масштабах времени температура менялась не более, чем на 50 °С². Это грубая оценка амплитуды климатических колебаний. Более точные расчёты сделаны для исторического периода 100–1000 лет и показывают сложный характер температурных колебаний на поверхности Земли³.

Исследования климатической системы Земли – одна из важнейших

² Кропоткин П.Н., Поляк Б.Г. Энергетический баланс Земли // *Земная кора сейсмоопасных зон*. М., 1973. С. 7–24. (Верхняя мантия; № 11).

³ Демежко Д.Ю. *Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала)*. Екатеринбург, 2001.

фундаментальных задач XX–XXI века. Повышенный интерес к этой проблеме стимулируется продолжающимся глобальным повышением среднегодовой температуры. Причины потепления (точнее, количественное соотношение различных факторов, как естественных, так и антропогенных) пока остаются предметом научных дискуссий.

В то же время экономическая цена, казалось бы, чисто научных выводов весьма высока. От них напрямую зависят перспективы развития мировой экономики.

Источники генерации энергии

Точные оценки генерации различных источников энергии затруднительны, но на основании обобщения существующих геологических, планетарных и астрономических фактов можно в первом приближении рассчитать энергетический баланс Земли, то есть соотношение его приходной и расходной частей.

На протопланетной стадии основным источником энергии являлась энергия аккреции холодного вещества протопланетного газопылевого облака. Высказанная в конце 40-х годов XX века О.Ю. Шмидтом⁴ и Ф. Хойлом⁵ (рис. 1)⁶ эта гипотеза

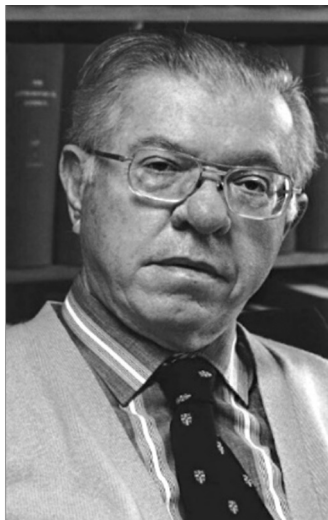
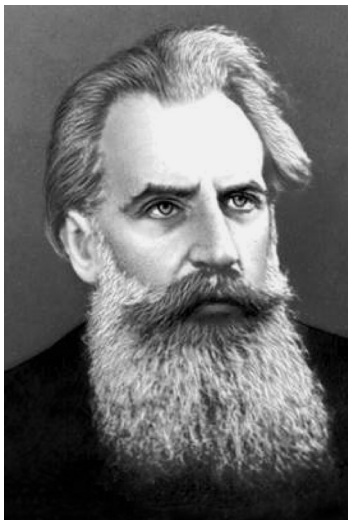


Рис. 1. О.Ю. Шмидт (1891–1956) (слева), Ф. Хойл (1915–2001) (справа)

оказалась на редкость плодотворной не только при объяснении механизма образования планет, но также и при рассмотрении эволюции Земли на планетной стадии её развития. Величина энергии аккреции огромна – $23 \cdot 10^{31}$ Дж. Часть этой энергии (примерно 15%) ушла на упругое сжатие вещества в земных недрах, но и оставшейся энергии было достаточно для разогрева Земли. По оценкам В.С. Сафронова⁷, процесс формирования планеты Земля длился 10^8 лет, поэтому энергия аккреции не расплавляла земное вещество полностью. Температура недр повышалась постепенно и достигла к концу протопланетного периода ($3 \cdot 10^9$ лет назад) 1500°C на глубине 500 км в мантии. Таким образом, первичная энергия аккреции

⁴ Шмидт О.Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли. М., 1949.

⁵ Хойл Ф. Галактики, ядра и квазары. М., 1968.

⁶ Академик Отто Юльевич Шмидт, Герой Советского Союза, знаменитый математик, геофизик, полярник, руководитель Арктических

экспедиций, один из основателей Института Физики Земли РАН; Фред Хойл – известный британский астроном и космолог. Член Лондонского королевского общества.

⁷ Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., 1969.

сыграла свою главную роль в младенческом возрасте планеты.

Вклад радиогенной энергии в общий энергетический баланс также оценивается по-разному. За первые 200 млн лет существования Земли практически полностью распались короткоживущие радиоактивные изотопы, выделяющие заметную долю тепла при распаде: ^{26}Al , ^{10}Be , ^{60}Fe , ^{36}Cl , имеющие период полураспада 10^6 – 10^7 лет. Заметно уменьшилось и количество долгоживущих изотопов с периодом полураспада $n \cdot 10^9$ лет: ^{87}Rb , ^{115}In , ^{148}Sm , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . Из перечисленных изотопов три последних дают основной вклад в современный тепловой режим, так как их энергия спонтанного распада в 10^3 – 10^4 раз выше энергии распада остальных изотопов. Общий вклад радиогенной энергии составляет $(0.4\text{--}2.0) \cdot 10^{31}$ Дж.

Выделение радиогенного тепла спровоцировало процесс гравитационной дифференциации геосфер, то есть формирование внешнего и внутреннего ядра, мантии и земной коры. Наибольшая энергия, выделившаяся за геологический период развития Земли, связана с процессом образования земного ядра. По оценкам разных авторов она составляет $(1.45\text{--}4.60) \cdot 10^{31}$ Дж. Пик выделения энергии гравитационной дифференциации (гравигенной энергии) приходится, по-видимому, на период $(2\text{--}3) \cdot 10^9$ лет тому назад, когда сформировались протоконтинентальные блоки, а затем доля гравигенной энергии падала, хотя сейчас, вероятно, она превышает величину радиогенной энергии.

Оценки энергии приливного трения дают значения $(0.3\text{--}0.4) \cdot 10^{31}$ Дж и согласуются в большинстве публикаций.

Интенсивность выделения энергии каждым из источников менялась во времени. Так, выделение энергии за счёт радиоактивного распада преобладало над энергией гравитационной дифференциации лишь на самых ранних этапах развития Земли. Но уже через миллиард лет после образования планеты ведущим энергетическим процессом становится переход потенциальной энергии гравитационной дифференциации в тепло при образовании земного ядра.

Эволюция термической истории Земли в начальный период представляется следующим образом. Интенсивное выделение аккреционной, приливной и радиогенной энергии, а также замедленность конвективного теплообмена привели к разогреву недр планеты, что могло вызвать плавление окислов железа. Они интенсивно начали тонуть в силу своей большей плотности по сравнению с силикатным веществом и образовали ядро Земли. Дифференциация ядра ещё больше повысила температуру в недрах, что привело уже к плавлению базальтов и излиянию их на поверхность Земли, а также внедрению в верхние геосферы, где продолжился процесс дифференциации⁸. Это обусловило расслоение мантии и образование литосферы, астеносферы, а в дальнейшем и земной коры. Таким образом, в начальный период жизни планеты происходил её разогрев, но с началом активных геологических процессов (3.7 млрд лет назад), гораздо интенсивнее стали происходить теплопотери, что привело к выравниванию скоростей генера-

⁸ Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Глобальная эволюция Земли. М., 1991.

ции и потерь тепла в виде его излучения в мировое пространство.

Генерируемая Землей энергия не сразу излучается в космос. Земля – это низкотеплопроводное тело, поэтому энергия с поверхности ядра, распространяемая кондуктивным путём, ещё до сих пор не достигла поверхности Земли. Скорость конвективного теплопереноса на восемь порядков больше скорости продвижения кондуктивного теплового фронта, поэтому в зонах активного вулканизма и разгрузки глубинного тепла мы можем наблюдать привнос мантийного вещества. Скорость распространения тепла, генерируемого в мантии, соизмерима со скоростью протекания геологических процессов, поэтому очевидно, что энергия излучается после многочисленных трансформаций в геологических процессах, которые она, собственно, и вызывает.

Процессы трансформации энергии

Процессы трансформации представляют собой работу деформаций скалывания и сжатия (растяжения), а также работу фазовых и физико-химических преобразований вещества. Часть этой энергии, непосредственно преобразующейся в тепло, затем теряется Землей, а другая часть аккумулируется, переходит в так называемый латентный запас. Этот запас тоже может выделиться при изменении структурно-геологических условий.

Деформации скалывающего типа реализуются в виде пластического течения и нарушения сплошности среды, оро- и эпейрогенеза, складчатости, то есть практически всех типов тектонических деформаций.

В процессе этих деформаций питающая их энергия частично переходит в свободную энергию возникающих поверхностей разрыва, частично – в скрытую теплоту образования в разломных зонах новых минералов, например руд. Главный же вид трансформации – это переход энергии в тепло тектонического трения (фрикционное тепло). Фрикционное тепло не может вызвать тектонические движения, но является их обязательным следствием и способствует нагреванию и даже плавлению твёрдых земных пород, как это, очевидно, происходит в зонах субдукции⁹, что приводит к вулканизму островных дуг. Некоторые исследователи придавали фрикционному теплу главную роль как энергетическому источнику тектонических процессов. Однако следует помнить, что этот вид тепла является лишь реакцией на деформацию земных масс, происходящую под действием первичного тепловыделения.

Самый яркий вид реакции земных масс на напряжения – это землетрясения. Почти вся энергия землетрясений выделяется в верхних 100 км Земли, в тонкой “поверхностной плёнке”. Упругие сейсмические колебания постепенно затухают, вызывая нагревание поглощающей пластичной среды и трение во вновь образующихся разломах. Оба эти эффекта вызывают некоторое увеличение теплового потока через поверхность Земли.

Энергетический эффект сейсмической деятельности проявляется неравномерно в пространстве и во времени. Мы хорошо знаем, что

⁹ Субдукция – процесс погружения одних блоков земной коры под другие, происходящий вдоль линейной зоны на границе литосферных плит.

95% этой энергии выделяется в двух подвижных поясах Земли: в Тихоокеанском и Альпийско–Гималайском, занимающих лишь 5% территории планеты. Средняя мощность сейсмических явлений на протяжении длительного геологического периода на несколько порядков ниже, чем в течение отдельных отрезков времени. Поэтому оценки эффекта сейсмичности на основании инструментальных наблюдений за исторический период, составляющие от $3 \cdot 10^{17}$ (Б. Гутенберг и К. Рихтер) до 10^{19} Дж/год (Л. Кнопофф), могут быть сильно завышенными и не должны безоговорочно включаться в геоэнергетический баланс.

Такая же резкая пространственно-временная изменчивость характеризует и энергетический эффект процесса складкообразования в земной коре. Изучая его методами физического моделирования, М.В. Гзовский установил, что 75% общего эффекта этого процесса связано с пластической деформацией горных пород, то есть расходуется на необратимые изменения формы и объёма геологических тел. Оценки расхода энергии этого вида на основании плиоцен-четвертичных тектонических процессов составляют $1.8 \cdot 10^{17}$ Дж/год, причем 90% этого эффекта реализуются в "подвижных кайнозойских геосинклиналях"¹⁰.

Необходимо понимать, что количественная оценка энергетического эффекта скалывающих деформаций за всю историю Земли невозможна. Можно, однако, утверждать, что этот вид трансформаций вносит малый вклад в наблюдаемый тепловой поток.

Работа фазовых и химических превращений земного вещества, направленная на увеличение его плотности, совершается главным образом за счёт гравитенной энергии. По-видимому, с этими процессами связано существование поверхности Мохоровичича, волновода на глубинах 400–1000 км в верхней мантии и границы между ядром и мантией. Природа этих переходов сейчас ещё не ясна. Существует на этот счёт несколько мнений: о переходе силикатов в металлическую фазу (гипотеза Лодочникова–Рамзая), о восстановлении окислов железа углеродом (Дж. Ирияма), о фазовых полиморфных переходах на границах волновода и Мохо (В.А. Магницкий), об образовании металлогидратов (В.Н. Ларин).

Количественные оценки затрат энергии на формирование глубинных геосфер оцениваются в $(1.6–2.2) \cdot 10^{31}$ Дж. К той же группе процессов относятся физико-химические преобразования в земной коре: метаморфизм и гипергенез. Прогрессивный метаморфизм является эндотермическим процессом, и, следовательно, увеличивает скрытый резерв внутренней энергии. Такую же роль играют и процессы седиментогенеза, в ходе которых в осадках аккумулируется солнечная энергия. Однако удельный эффект метаморфизма и седиментогенеза сравнительно мал. Он не превышает 10^5 Дж/кг, что выражается величинами плотности теплового потока в десятки или даже сотые доли мВт/м². Напротив, процессы гипергенеза – окисление, гидратация, растворение и гидролиз – имеют экзотермическую направленность и характеризуются теми же величинами в энергетических единицах,

¹⁰ Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., 1975. С. 454.

то есть обеспечивают переход резерва энергии в подвижную часть энергетического баланса. То же происходит при переплавлении метаморфизованных толщ или при их регрессивном метаморфизме.

Промежуточной формой трансформации внутренней энергии является современное теплосодержание Земли (запас тепла в её различных геосферах). Суммируя вклад всех указанных процессов, получаем огромную величину скрытого резерва внутренней энергии Земли – $9 \cdot 10^{31}$ Дж, что в три раза превышает оценку суммарной генерации. Такое расхождение говорит о необходимости переоценки роли и генерации тепла и теплосодержания в скрытых формах.

Излучение внутриземной энергии

Расходная часть энергетического баланса поддается непосредственному измерению, так как состоит из двух видов потери Землёй её внутренней энергии: в виде кондуктивного теплового потока через поверхность Земли и в виде конвективного выноса тепла при вулканизме и гидротермальной деятельности. Подсчитаем величину общих теплотерь Земли.

Распределение кондуктивного теплового потока на поверхности земного шара крайне неравномерно, но мы вправе для балансовых расчётов оперировать средней его величиной. По последним оценкам он составляет 56 и 76 мВт/м², соответственно, для континентов и океанов¹¹. Таким образом, полный вынос

энергии с поверхности планеты кондуктивным путём оценивается величиной $3.1 \cdot 10^{13}$ Вт, или 10^{21} Дж/год. За весь геологический период развития Земли планета отдала в мировое пространство $0.45 \cdot 10^{31}$ Дж. В отличие от кондуктивного теплового потока конвективный вынос локализуется в ограниченной части земной поверхности – в вулканических областях переходных зон и в рифтовых зонах континентов и океанов.

После открытия глобальной системы срединно-океанических хребтов протяженностью 60 тыс. км пришлось пересмотреть прежние оценки роли конвективного выноса тепла из земных недр, так как практически во всех хребтах из их центральных долин происходит разгрузка магмы и термальных вод.

По расчётам Б.Г. Поляка¹², вынос тепла вулканизмом суши оценивается в $(0.38–13.2) \cdot 10^{18}$ Дж/год, гидротермами суши – $(1.9–2.8) \cdot 10^{18}$ и срединно-океаническими хребтами – $(0.44–3.46) \cdot 10^{18}$ Дж/год. Эти оценки мощности, однако, не дают возможности оценить общие конвективные теплотери за геологический период существования планеты, так как конвективная мощность менялась во времени – периоды резкого возрастания вулканизма сменялись периодами относительной пассивности; то же можно, вероятно, сказать и о гидротермальной деятельности. Из этих соображений при подсчёте общих теплотерь оперируют их мощностью. Оценки показывают,

тального и океанического среднего связано со значительным количеством измерений в дивергентных и конвергентных зонах Мирового океана, характеризующихся иногда аномально высоким тепловым потоком.

¹² Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М., 1988.

Теплопотери Земли

Виды теплопотерь	Современная мощность		Ссылки
	Глобальная, Вт	Удельная, мВт/м ²	
Кондуктивный тепловой поток			
через континентальную кору	$(1.0-1.3) \times 10^{13}$	49–60	13
через океаническую кору	1.6×10^{13}	50–65	14
среднепланетарный	$(2.5-3.2) \times 10^{13}$	49–63	15
Адвективный вынос тепла			
вулканизмом суши	$(0.12-4.2) \times 10^{11}$		16
гидротермами суши	$(0.6-0.9) \times 10^{11}$		17
общий в срединно-океанических хребтах	$(0.4-1.1) \times 10^{13}$		
Суммарные теплопотери			
через континентальную кору	$(1.0-1.3) \times 10^{13}$	49–67	19
через океаническую кору	2.5×10^{13}	95–100	20
среднепланетарные	$(2.5-4.3) \times 10^{13}$	49–85	21

¹³ Смирнов Я.Б. Тепловая энергия Земли и её геологические проявления // Докл. АН СССР, 1967, т. 177, № 2. С. 325–328; Sclater J., Jaupart C., Galson D. The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat losses by the Earth // Review Geophys. and Space Phys, 1980. Vol. 18. P. 269–311.

¹⁴ Смирнов Я.Б. Тепловая энергия Земли и её геологические проявления // Докл. АН СССР, 1967, т. 177, № 2. С. 325–328; Кропоткин П.Н., Поляк Б.Г. Энергетический баланс Земли // Земная кора сейсмоопасных зон. М., 1973. С. 7–24. (Верхняя мантия; № 11); Sclater J., Jaupart C., Galson D. The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat losses by the Earth // Review Geophys. and Space Phys, 1980. Vol. 18. P. 269–311.

¹⁵ Смирнов Я.Б. Тепловая энергия Земли и её геологические проявления // Докл. АН СССР, 1967, т. 177, № 2. С. 325–328.

¹⁶ Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М., 1988; Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Глобальная эволюция Земли. М., 1991.

¹⁷ Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М., 1988.

¹⁸ Смирнов Я.Б. Тепловая энергия Земли и её геологические проявления // Докл. АН СССР, 1967, т. 177, № 2. С. 325–328; Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Глобальная эволюция Земли. М., 1991; Sclater J.G., Parsons B., Jaupart C. Oceans and continents: similarities and differences in the mechanism of heat loss // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. № B12. P. 11535–11552.

¹⁹ Sclater J., Jaupart C., Galson D. The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat losses by the Earth // Review Geophys. and Space Phys, 1980. Vol. 18. P. 269–311.

²⁰ Sclater J., Jaupart C., Galson D. The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat losses by the Earth // Review Geophys. and Space Phys, 1980. Vol. 18. P. 269–311; Sclater J.G., Parsons B., Jaupart C. Oceans and continents: similarities and differences in the mechanism of heat loss // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. № B12. P. 11535–11552.

²¹ Смирнов Я.Б. Тепловая энергия Земли и её геологические проявления // Докл. АН СССР, 1967, т. 177, № 2. С. 325–328; Chapman D., Pollack H. Global heat flow: a new look // Earth. Planet. Sci Lett. 1976. Vol. 28, № 1. P. 23–32; Lee W., Uyeda S. Review of heat flow data // Terrestrial heat flow. Washington, DC: Amer. Geophys. Union, 1965. P. 87–190.

что мощность кондуктивного выноса на два порядка больше, чем мощность конвекции. Таким образом, можно рассчитать мощность суммарных теплопотерь Земли. Она равна $4.2 \cdot 10^{13}$ Вт, или $1.3 \cdot 10^{21}$ Дж/год, что приблизительно за время существования Земли дает величину $\approx 0.5 \cdot 10^{31}$ Дж. Эта цифра существенно ниже, чем общее энерговыделение в Земле за всю её историю и в три раза ниже современного теплосодержания. Из этого следует, что наша планета ещё очень далека от "тепловой смерти".

Количественные оценки суммарных эффектов кондуктивного теплового потока, вулканизма и гидротермальной деятельности в континентальном и океаническом "сегментах" земной коры суммированы в таблице.

Эти данные позволили объективно оценить общие современные теплопотери Земли, стимулируя анализ планетарного геозенергетического баланса. Основы этого анализа были заложены в Геологическом институте АН СССР П.Н. Кропоткиным (рис. 2) в его пионерской работе "Основные проблемы энергетики тектонических процессов"¹³. Но такой анализ сильно затруднён большой условностью имеющихся оценок вероятных "первичных источников" внутриземной энергии – радиоактивного распада U, Th и K, гравитационной дифференциации, ротационногенно-



Рис. 2. Академик
П.Н. Кропоткин (1910–1996)

го тепла и др. По грубо ориентировочным оценкам¹⁴, потенциала этих источников – недостаточно чтобы обеспечить накопление энергии в теле планеты (в виде глубинного тепла и др.) и её отдачу в околоземное пространство за всю историю Земли. Возможно, однако, что это расхождение – только кажущееся из-за неточности оценок различных эффектов, тем более, что предполагаемая современная мощность "первичных источников" оказывается больше наблюдаемых теплопотерь. Таким образом, проблема геозенергетического баланса пока ещё далека от разрешения. Но данные такого рода имеют ключевое значение для создания правильной картины эволюции Земли и оценки её нынешнего состояния, что оправдывает любые усилия, направленные на их уточнение. Последнее представляется одной из важнейших задач будущих исследований.

Мы должны ясно себе представлять, что проблема энергетического баланса ещё далека от разрешения, потому что незнание всего лишь одной компоненты приводит к кажущемуся дисбалансу. Следовательно, без детальной информации о тепловом поле мы не решим основную задачу теоретической геологии – познание эволюции нашей планеты.

Мы должны ясно себе представлять, что проблема энергетического баланса ещё далека от разрешения, потому что незнание всего лишь одной компоненты приводит к кажущемуся дисбалансу. Следовательно, без детальной информации о тепловом поле мы не решим основную задачу теоретической геологии – познание эволюции нашей планеты.

¹³ Кропоткин П.Н. Основные проблемы энергетики тектонических процессов // Изв. АН СССР, Сер. геол. 1948. № 5. С. 89–104.

¹⁴ Кропоткин П.Н., Поляк Б.Г. Энергетический баланс Земли // Земная кора сейсмоопасных зон. М., 1973. С. 7–24. (Верхняя мантия; № 11); Поляк Б.Г., Кропоткин П.Н., Макаренко Ф.А. Основные проблемы геозенергетики // Энергетика геологических и геофизических процессов / Ред. П.Н. Кропоткин. М., 1972. С. 7–26. (Тр. МОИП. Отд. геол.; Т. 46).